

J. Biomed. Eng. Res.
Vol. 20, No. 5, 545-557, 1999

정량적 방법에 의한 미만성 폐질환 진단

원철호* · 김명남*** · 이승민**** · 최대진* · 강다식****

*계명대학교 동산의료원 의공학과, **경북대학교 의과대학 의공학교실,

***경북대학교 의과대학 진단방사선과교실

(1999년 4월 12일 접수, 1999년 8월 7일 채택)

Diagnosis of Diffuse Lung Disease by Quantitative Analysis

C.H. Won*, M.N. Kim***, J.M. Lee****, T.J. Choi*, and D.S. Kang****

*Department of Biomedical Engineering, Dongsan Medical Center, Keimyong University

***Department of Biomedical Engineering, School of Medicine, Kyungpook National University

****Department of Diagnostic Radiology, School of Medicine, Kyungpook National University

(Received April 20, 1999, Accepted August 7, 1999)

요약: 본 논문에서는 호흡 운동 장치와 EBT로부터 획득한 폐실질 영상에 대하여 동적 윤곽선 모델 방법과 영역 성장법을 이용하여 폐실질 영역을 검출하였다. 그런 다음 검출된 폐실질 영역내에서 각종 정량적 요소들을 도출하여 농도 분포 곡선에 대한 분석을 하였다. 동적 윤곽선 모델방법에서 폐실질 영역의 낮은 휘도 준위와 폐의 윤곽선 매터 방향은 고려한 에너지 함수를 제안하였다. 그리고 폐실질 영역 성장법에서는 폐실질 영역내의 분포한 공기 성분에 대한 화소를 확장시켜 효과적으로 폐실질 영역을 검출하였다. 추출된 폐실질 영역내의 휘도 분포 곡선을 분석하여 정상군과 비교한 결과 만성 폐쇄성 폐질환자에서는 정상인에 비하여 평균 농도, 최대 휘도 농도, 최대 상승 기울기 농도가 낮았으며, 농도 분포 곡선은 더 낮은 쪽으로 이동하였음을 알 수 있었다. 또한, 특발성 폐섬유증 환자에서는 평균 농도, 최대 휘도 농도, 최대 상승 기울기 농도가 모두 증가되었고 농도 분포 곡선은 더 높은 쪽으로 이동하였다. 폐실질 영역을 추출하여 히스토그램 분포에 대한 정량적 분석을 함으로써 임상인으로부터 만성 폐쇄성 질환자와 특발성 폐섬유증 환자를 구분할 수 있었다.

Abstract: We extracted the lung parenchyma using the dynamic contour model and region growing for the lung image acquired from EBT and spirometry gating system. After that, we induced quantitative parameters and analyzed histogram curve. In dynamic contour model, we proposed new energy function based on the low intensity level of lung parenchyma and the direction of contour vector. In region growing method, we extracted the lung parenchyma region by expanding pixels related to air density in parenchyma. And we analyzed histogram curve of the extracted lung parenchyma region. In emphysema patient group, we found mean density, maximal frequency density and maximal increasing gradient were decreased than people who were in the normal status. Also, we found the histogram curve was moved to the lower density. In idiopathic pulmonary fibrosis patient group we found mean density, maximal frequency density, and maximal ascending gradient were increased and the histogram curve was moved to the higher density. Therefore, emphysema patient and idiopathic pulmonary fibrosis patient could discriminate easily from the normal status by quantitative analysis for the histogram distribution of the extracted lung parenchyma region.

Key words: EBT, Spirometry gating, Dynamic contour model, Histogram analysis

본 연구는 보건복지부에서 주관한 98년도 보건의료기술연구개발사업의 지원(HMP-98-E-1-0007)에 의하여 이루어진 것임.

통신저자: 김명남(700-721), 대구광역시 중구 삼덕동 경북대학교 의과대학 의공학교실

Tel. (053) 420-5206, Fax. (053) 420-5264

서 론

최근 폐실질의 평균농도(CT mean value)를 구하고 폐실질 농도(CT density)의 빈도분포(frequency distribution)에 대한 정량적인 히스토그램 분석을 수행함으로써 정상군과 폐질환군을 파악하고자 하는 연구가 진행되어 오고 있다^{1,2)}. 질병의 초기에 폐기능의 변화폭 형태학적 이상보다 선행시키는 질환들은 대부분의 비만성 폐질환 질환으로서 만성 폐쇄성 폐질환, 간질성 폐질환, 폐부종 등이며 만성 폐쇄성 폐질환은 폐기종과 만성 기관지염으로 나눌 수 있다³⁾. 폐기종의 특징은 폐실질내 공기비율의 증가와 호기시의 공기 가둠 현상(air trapping) 등이 나타나기 때문에 공기비율의 증가로 평균 폐실질 농도가 낮아져 곡선의 이동이 나타나고 그 이동량은 정량적으로 분석할 수 있다. 폐부종은 폐간질내 수분의 증가로 간질의 비후와 공기로 채워진 공간내의 수분삼출이 생길 수 있는 질환이다. 따라서, 또한 호기정도에 따른 농도분포 곡선의 정량적 요소들이 정상과는 유의한 차이가 나기 때문에 폐실질 농도 분포 분석을 함으로써 정상군으로부터 질환군을 구별할 수 있다.

일반적으로 폐질환은 흉부방사선 사진(CXR)과 고해상 전산화 단층촬영(HRCT)을 이용하여 진단한다. CXR은 저휘하고 공간 분해능이 뛰어나 폐질환 진단을 위하여 첫 번째 검사로써 유용하나 병변이 중첩되어 보이게 되므로 정확한 위치 결정에 어려움이 있어 질환의 진단과 감별에 있어 민감도와 특이도가 떨어진다. HRCT는 구조물들이 겹쳐 보이지 않아 병변의 형태와 분포를 훨씬 잘 파악할 수 있어 질환의 진단과 감별에 우수하다. 하지만, 폐환자의 호흡 수준에 따라 폐용적이 변화하기 때문에 HRCT 영상으로부터 폐기능을 정량적으로 평가하는 것은 곤란하며 호흡 조절기를 이용하여 폐실질 농도의 빈도 분포에 분석에 대한 연구가 진행되고 있다. Rienmueller 등은 개에 대하여 농도 분포 곡선 분석을 하여 폐용적이 증가함에 따라 폐실질 평균 농도와 FWIM(full width at half maximum)이 감소함을 보였으나 실제 임상에서 폐질환자를 대상으로 하지는 않았다⁴⁾. Beinert 등은 50% 폐활량 상태에서의 평균 농도가 정상 대조군과 비교하여 만성 폐쇄성 질환자에서 낮고 특발성 폐섬유증 환자에서 높다고 하였다⁵⁾. 그러나 특정한 호흡 수준에서만 농도 분포 분석을 행하였으며, 평균 농도 곡선의 변화에 대한 관찰만에 의하여 정상과 비정상을 구분하였다. 그러므로 더욱 향상된 진단기법을 개발하기 위하여 호흡 수준을 달리 할 때 발생할 수 있는 CT 농도 분포의 변화와 평균 농도와 FWHM 이외에 다양한 지수들 도출하기 위한 정량적인 분석에 의한 연구가 필요하다.

따라서, 본 논문에서는 초고속 촬영이 가능한 전자선 단층촬영장치(EBT)와 호흡 연동 장치류 이용하여 각 호흡방에 따른 재현성이 있는 폐의 흉부영상을 획득하였으며 폐실질 영역을 검출하기 위하여 동적 윤곽선 모델⁶⁾에 기반한 방법과 영역 성장법¹⁰⁾을 사용하였다. 그런 다음, 검출된 폐실질 영역내에서 각종 정량적 요소들을 도출하여 농도 분포 곡선에 대한 정

량적인 분석을 수행하였다.

본 논문에서 사용된 동적 윤곽선 모델에 의한 방법에서는 폐실질 영역내에 분포되어있는 공기 성분으로 인하여 어둡게 나타나는 폐실질의 휘도 순위와 폐의 윤곽선의 벡터 방향을 고려한 에너지가 부가된 새로운 에너지함수를 제안하였으며 폐실질 영역 성장법에서는 폐실질 영역내의 분포한 공기 성분에 대한 화소를 확장시켜 효과적으로 폐실질 영역을 검출하였다.

또한, 추출된 폐실질 영역의 농도 분포 곡선에 대한 효과적인 정량적 분석을 위하여 기존의 FWIM외에 폐실질 평균 농도, 최대 빈도 농도, 최대 상승 기울기, 최대 상승 기울기 농도, 최대 하강 기울기, 최대 하강 기울기 농도 등의 지수들을 도출하여 정상군과 폐질환군에 적용하였다.

제안한 방법을 임상에 적용한 결과, 만성 폐쇄성 폐질환자에게는 정상군에 비하여 평균 농도, 최대 빈도 농도, 최대 상승 기울기 농도가 감소하였으며, 농도 분포 곡선은 정상군의 농도 분포 곡선에 비하여 더 낮은 쪽으로 이동하였다. 또한, 특발성 폐섬유증 환자에서는 평균 농도, 최대 빈도 농도, 최대 상승 기울기 농도가 증가되었고 농도 분포 곡선은 더 높은 쪽으로 이동하였다. 따라서, 폐실질 영역은 추출하여 농도 분포 곡선을 성장식으로 분석함으로써 정상군으로부터 만성 폐쇄성 질환과 특발성 폐섬유증을 구분할 수 있었으며 이들 지수들의 변화를 추적함으로써 진단에 이용될 수 있음을 확인하였다.

EBT와 호흡연동

회전 x선관을 이용하는 일반적인 CT와는 달리 EBT 스캐너는 전자총에서 생성된 전자빔을 환자를 둘러싸고 있는 반원형의 타겟링(target ring)의 내부를 스위프함으로써 x선을 발생시킨다. EBT는 동작원리 및 구조도상에서 기계적인 운동이 없으므로 영상의 획득시간을 50~100ms 정도로 감소시킬 수 있어 짧은 시간에 많은 단층 영상을 획득할 수 있기 때문에 시간적으로 변화하는 폐실질이나 심장의 실시간 촬영에 적합하다¹¹⁾.

특히 흉부촬영시에는 호흡 주기에 따른 흉부 영상의 변형을 방지하고 관독의 일관성을 부여하기 위하여 일반적으로 영상은 호기시 숨을 완전히 멈춘 상태에서 획득하고 있다. 그러나 이렇게 획득한 영상은 움직임 요인에 의한 화질저하는 어느 정도 방지할 수 있으나 현실적으로 환자의 호흡조절 및 멈춤이 용이하지 않기 때문에 다음에 동일한 부위를 갖는 상태에서 영상을 촬영할 수 없는 단점을 갖고 있다. 따라서 미리 설정된 환자의 호흡레벨에서 호흡을 실시시킬 수 있는 호흡연동장치가 필요하다⁷⁾. 본 연구에서 제작한 호흡연동장치에는 호흡레벨을 측정하기 위하여 금속그물망(mesh)양단의 압력의 차이를 감지하여 공기의 흐름량을 측정할 수 있는 차압트랜스듀서방식의 폐활량계(spirometer)를 이용하였으며 촬영동안 공기의 흐름을 정지시키기 위하여 공기흐름 소선부는 공기봉선방식의 밸브를 채용하였다. 또한, 이들을 제어하기 위하여 퍼스널 컴퓨터를 사용하였다. 이러한 시스템에 EBT를 이용하여 각 호흡방에 따른 폐단면 영상은 다른 시간에 반복적으로 획득할 수 있으므로 재현성이 있

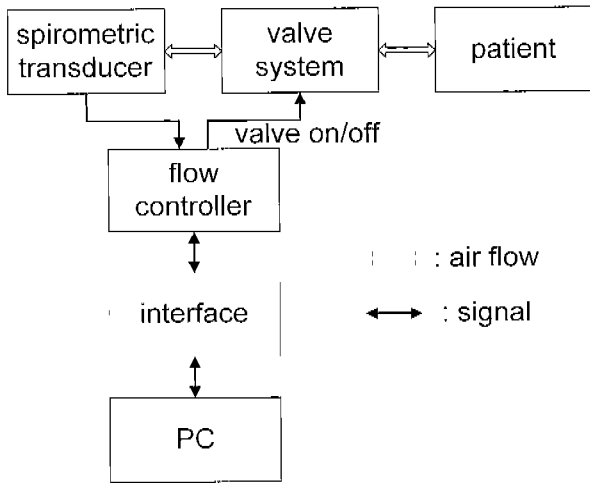


그림 1. 호흡연동장치의 모식도
Fig. 1. Block diagram for spirometry gating system.

는 폐의 정지 영상을 획득할 수 있어 폐의 진단 및 시간적 변화에 따른 폐의 변화량 추정하는데 많은 도움이 된다. 또한, 획득된 단면영상으로써 전체 폐실질에 걸친 3차원 영상화도 가능하다. 본 연구에 사용된 호흡연동장치의 모식도는 그림 1에서 보였다.

폐실질 영역의 검출

1. 폐실질 영역 성장법(region growing)

먼저, 폐실질 영역을 검출하기 위하여 내부의 초기 지점으로 부터 영역 성장을 수행하게 된다. 영역 성장법은 아래 그림과 같이 네 방향을 탐색하면서 초기 지점과 탐색 화소의 휘도 준위의 차이가 일개치 이하일 때, 즉 식 (1)에서와 같이 유사한 통계적 특성을 가지는 화소를 폐실질 영역에 포함시키고 이 지점을 기준으로 하여 반복적으로 영역 성장을 수행하여 전체 폐실질 영역을 검출하는 방법이다.

$$|I_k(i, j) - I_0(i, j)| \leq Threshold, \quad k=1 \sim 4 \quad (1)$$

여기서, $I_0(i, j)$ 는 중심 화소이고 $I_k(i, j)$ 는 이웃하는 네 화소이다. 폐실질 영역 내부는 비교적 휘도 준위가 낮으며 변화가 거의 없지만 보다 높은 휘도 준위를 가진 폐 가지들이 분포해 있다. 영역 성장법에 의한 폐실질 영역 탐색시 휘도 준위가 낮은 폐실질 영역은 검출되지만, 휘도 준위가 높은 폐 가지들은 검출된 폐실질 영역 내부에 잠음으로서 남게 된다. 따라서, 이들 영역을 제거한 후에 폐의 윤곽선을 검출하기 위한 후처리 과정이 필요하다. 먼저, 영역 성장된 영상에서 에지를 검출하면 검출하고자 하는 폐실질 영역의 윤곽선과 내부의 가지 영역들에 대한 윤곽선이 생성된다. 이때 EBT 영상에서 폐실질 영역의 윤곽선이 가장 바깥쪽에 위치하게 되므로 상단에서 하단으로

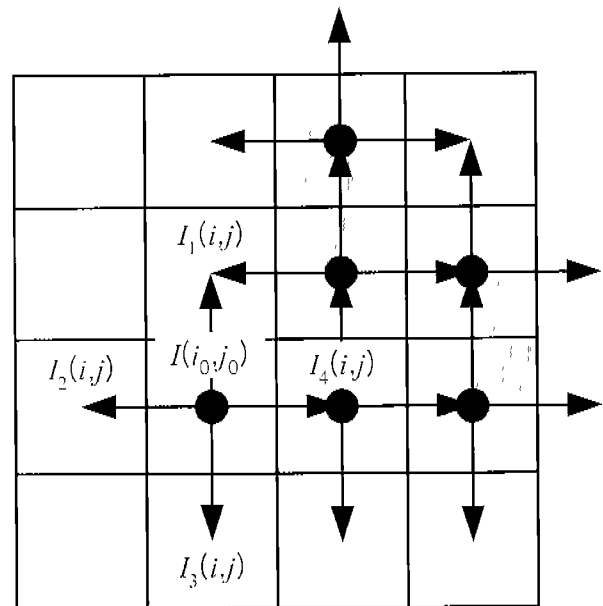


그림 2. 영역 성장법에 의한 폐실질 영역의 검출
Fig. 2. The extraction of the lung parenchyma by region growing.

검색하면서 첫 번째 윤곽선 화소에 대하여 에지 추적을 수행하면 최종적으로 폐실질 영역의 윤곽선을 검출할 수 있다. 다음 그림 3에 영역 성장에 의한 폐 윤곽선 검출 과정을 보았다.

2. 동적 윤곽선에 의한 폐실질 영역의 검출

동적 윤곽선 모델에 의한 영역 검출은 조작자가 설정한 초기 윤곽선으로부터 에너지가 최소가 되는 방향으로 동적 윤곽선의 각 화소들을 이동시켜 최종적인 윤곽선을 결정하는 방법이다.

본 논문에서는 폐실질영역을 효과적으로 검출하기 위하여 기존의 동적 윤곽선 모델에 적용되는 에너지함수에 폐실질 영역의 특성을 고려한 에너지 E_{bnd} 를 추가한 식(2)의 새로운 에너지함수를 제안하였다.

$$E = \int (\alpha(s)E_{\text{image}} + \beta(s)E_{\text{curv}} + \gamma(s)E_{\text{bnd}}) ds \quad (2)$$

여기서, $\alpha(s)$, $\beta(s)$, $\gamma(s)$ 는 각 에너지에 주어지는 가중치이다.

식 (5)의 첫 번째 에너지 함수 E_{image} 는 화소의 변화율 즉, 영상의 기울기를 의미하며 폐실질 영역의 경계선으로 윤곽선을 이동시키는 역할을 한다.

$$\nabla x_{i,j} = I_{i-1,j-1} + 2I_{i-1,j} + I_{i-1,j+1} - I_{i+1,j-1} - 2I_{i+1,j} - I_{i+1,j+1} \quad (3)$$

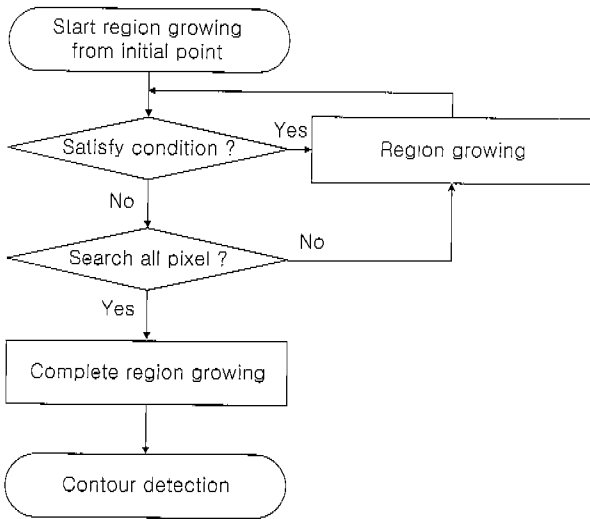


그림 3. 영역 성장법에 의한 폐실질 영역의 검출의 흐름도
 Fig. 3. The flowchart of extraction of the lung parenchyma by region growing.

$$\nabla y_{i,j} = I_{i-1,j+1} + 2I_{i,j+1} + I_{i+1,j+1} - I_{i-1,j-1} - 2I_{i,j-1} - I_{i+1,j-1} \quad (4)$$

$$E_{\text{image}} = \sqrt{(\nabla x_{i,j})^2 + (\nabla y_{i,j})^2} \quad (5)$$

여기서, ∇x 및 ∇y 는 각각 x 및 y 방향의 에지 성분이고, $I_{i,j}$ 는 영상의 휘도이다. 이 에너지는 기울기가 큰 에지 영역으로 동적 윤곽선 모델의 에너지를 최소화하게 된다.

식 (6)의 두 번째 에너지 곡률 E_{curv} 는 윤곽선의 각 정점에서 계산되며 이는 벡터가 이루는 각을 의미하며, 동적 윤곽선 모델의 곡률을 감소시키도록 에너지를 최소화한다.

$$E_{\text{curv}} = |V_{i-1} - 2V_i + V_{i+1}| \quad (6)$$

여기서, V_i 는 윤곽선의 한 정점, V_{i-1} 와 V_{i+1} 은 각각 이 정점의 좌우에 있는 정점이다.

제안한 새로운 에너지 E_{bright} 는 EBT 영상에서 폐실질 영역의 특징을 이용하는 인자로서 다음 식 (7)과 같다.

$$E_{\text{bright}} = (\theta_{\text{ref}} - \theta_{i,j}) \cdot I_{i,j}, \quad i, j = -1, 0, 1 \quad (7)$$

여기서, θ_{ref} 는 기준각으로서 그림 4에서 윤곽선을 이루는 인의 세 정점에서 중앙의 정점 $V_i(x_i, y_i)$ 를 기준점으로 하여 양쪽의 두 정점 $V_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1})$ 및 $V_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$ 이 이루는 각, $\theta_{i,j}$ 는 주변 여덟 화소 각각과 양쪽의 두 정점 $V_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1})$ 및 $V_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$ 과 이루는 화소각이

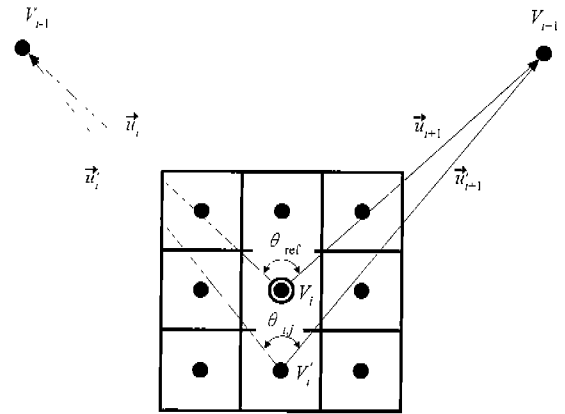


그림 4. 윤곽선을 구성하는 벡터와 탐색 영역의 화소
 Fig. 4. Vectors and pixels of the contour.

다. $I_{i,j}$ 는 3×3 창 내에서의 화소의 휘도이다. E_{bright} 는 기준각 θ_{ref} 와 화소각 $\theta_{i,j}$ 의 차와 휘도 $I_{i,j}$ 의 곱으로 정의되는 것으로, $\theta_{\text{ref}} - \theta_{i,j}$ 와 $I_{i,j}$ 모두 최소가 되는 정점, 즉 E_{bright} 가 최소가 되는 정점으로 윤곽선을 이동시키는 역할을 한다. 기준각과 화소각의 차 $\theta_{\text{ref}} - \theta_{i,j}$ 는 폐영역 내부로 윤곽선을 이동시키는 역할을 하고, $I_{i,j}$ 는 휘도 준위가 낮은 화소로 윤곽선을 이동시키는 역할을 한다. 즉, $\theta_{\text{ref}} - \theta_{i,j}$ 는 윤곽선의 정점들이 반시계 방향으로 배열되어 있을 때 내부 정점, $I_{i,j}$ 는 밝기가 작은 정점으로서의 윤곽선 이동, 이들의 곱은 윤곽선 내부의 밝기가 어두운 영역인 폐실질 영역으로 윤곽선을 이동시켜, 윤곽선을 검출하는 인자이다. θ_{ref} 와 $\theta_{i,j}$ 는 다음과 같이 구해진다. θ_{ref} 는 다음 식 (8)에 $\vec{u}_i = V_{i-1} - V_i$ 와 $\vec{u}_{i+1} = V_{i+1} - V_i$ 에 의해 구해지는 기준각이다.

$$\theta_{\text{ref}} = \cos^{-1} \frac{\vec{u}_i \cdot \vec{u}_{i+1}}{|\vec{u}_i| \cdot |\vec{u}_{i+1}|} \quad (8)$$

또한, 기준점을 둘러싸고 있는 여덟 화소 각각에 대하여 $\vec{u}'_i = V_{i-1} - V'_i$ 와 $\vec{u}'_{i+1} = V_{i+1} - V'_i$ 를 계산하여 화소각 $\theta_{i,j}$ 를 다음 식 (9)에 의해 구할 수 있다.

$$\theta_{i,j} = \cos^{-1} \frac{\vec{u}'_i \cdot \vec{u}'_{i+1}}{|\vec{u}'_i| \cdot |\vec{u}'_{i+1}|} \quad (9)$$

폐실질 영역의 윤곽선을 검출하기 위하여 폐실질 영역의 경계로 윤곽선을 이동시키는 에너지 E_{image} 와 초기 윤곽선으로부터 내부 방향으로 윤곽선을 이동시키는 에너지 E_{curv} 를 이용하여 폐실질 영역의 검출시에는 폐실질 영역 외곽에 존재하는 휘도 준위의 급격한 변화로 발생하는 에지 성분으로 인하여 폐실질 영역으로의 윤곽선의 이동이 이루어지지 않았으나, 폐실

질 내부의 휘도 준위를 고려하는 제한한 새로운 에너지는 그러한 제한을 받지 않는다.

히스토그램 분석

추출된 폐실질 영역 내에서 각 CT값에 대한 빈도 분포를 계산하여 이를 히스토그램 분석에 이용하였다. 먼저, 히스토그램의 각부적인 변화 성분을 제거하여 전체적인 변화 양태를 관찰하기 위하여 식 (10)의 평산화 연산을 하였다.

$$f_A(i) = \frac{1}{(2M+1)} \sum_{j=-M}^M f(i+j), \quad i=0 \sim 2047 \quad (10)$$

여기서, M 은 평산화 연산의 구간을 의미하며 20으로 설정하였다. 좌측 및 우측 폐실질 영역 데이터, 그리고 환자를 상호간의 발생하는 데이터의 편차를 제거하기 위하여 식 (11)과 같이 히스토그램의 최소값 f_{min} 과 최대값 f_{max} 를 구하여 100으로 데이터의 정규화를 하였다

$$f_R(i) = 100 \cdot \frac{f_A(i) - f_{min}}{f_{max} - f_{min}} \quad (11)$$

EBT 영상에서 폐실질 영역의 휘도 준위가 히스토그램상의 낮은 영역에 많이 분포하기 때문에 전체적으로 매우 어둡게 보이게 된다. 영상의 대조도 향상을 위하여 영상의 윈도우(window)와 레벨(level)을 소성한 다음 히스토그램 분석을 수행한다. 여기서, 윈도우는 영상에서 나타내고자 하는 휘도 범위를 뜻하며 2에서 2048의 크기를 가질 수 있고, 레벨은 설정된 윈도우의 중심을 의미하는 것으로서 EBT 영상의 해상도 범위인 -1024에서 1023까지의 값을 가진다.

히스토그램 분석을 통하여 정상인과 질환자의 구분에 필요한 진단 변수를 추출하기 위하여 다음과 같은 정량적인 파라미터들을 도출하였으며 본 논문에서는 히스토그램 상에서 구할 수 있는 다양한 파라미터들을 도출함으로써 진단에 의미있는 지수들을 찾고자 하였다.

평균 농도 $\bar{f}(i)$ 는 식 (12)와 같이 폐실질 영역의 전반적인 밝기를 뜻하며, 폐기종 환자일 경우 공기 성분으로 인하여 어둡게 나타나고, 폐섬유증 환자일 경우 정상인보다 큰 값을 가진다.

$$\bar{f}(i) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N i \cdot f(i) \quad (12)$$

여기서, $f(i)$ 는 농도 i 에서의 빈도, N 은 농도의 범위로서 2048이다. 식 (13)의 최대 빈도 농도 i_m 는 히스토그램 상의 최대 빈도 농도로서 히스토그램 분포의 이동을 알 수 있는 지표가 된다.

$$f_{max} = \max\{f(i)\}, \quad i=0, \dots, N \quad (13)$$

이때, 최대 빈도 f_{max} 는 최대 빈도 농도를 계산하기 위하여 사용한다. 식 (15)의 최대 상승 기울기 농도 $i_{m,a,u}$ 는 히스토그램의 미분치가 최고가 되는 농도, 즉 빈도 분포가 급격히 증가하는 농도를 의미하며, 식 (14)의 최대 상승 기울기 $g_{m,a,u}$ 는 증가하는 정도를 나타낸다.

$$g_{m,a,u} = \max\{g(i)\}, \quad i=0, \dots, i_m$$

$$g(i) = f(i+1) - f(i), \quad i=0, \dots, i_m \quad (14)$$

$$i_{m,a,u} = \{i \mid g(i) = g_{max}, \quad i=0, \dots, i_m\} \quad (15)$$

식 (17)의 최대 하강 기울기 농도 $i_{m,d,g}$ 는 히스토그램의 미분치가 최소가 되는 농도, 즉 빈도 분포가 급격히 감소하는 농도를 의미하며, 식 (16)의 최대 하강 기울기 $g_{m,d,g}$ 는 감소하는 정도를 나타낸다.

$$g_{m,d,g} = \min\{g(i)\}, \quad i=i_m, \dots, N$$

$$g(i) = f(i+1) - f(i), \quad i=i_m, \dots, N \quad (16)$$

$$i_{m,d,g} = \{i \mid g(i) = g_{min}, \quad i=i_m, \dots, N\} \quad (17)$$

FWHM(full width at half maximum)은 최대 빈도 f_{max} 의 1/2이 되는 좌우측 빈도 농도의 폭이며 히스토그램상에서 우세한 농도의 분포 범위를 알 수 있으며 식 (18)과 같다.

$$FWHM = \{i \mid f(i) = f_{max}/2, \quad i=0, \dots, i_m\}$$

$$- \{i \mid f(i) = f_{max}/2, \quad i=i_m, \dots, N\} \quad (18)$$

결과 및 고찰

실제 EBT 영상으로부터 폐실질 영역의 윤곽선을 검출하기 위한 기본 데이터는 Imatron, Inc.사의 EBT 영상장비로부터 획득하였으며, 이는 512×512화소 11비트로 양자화된 영상 데이터로서 한 파일내에 폐의 상위, 중위, 및 하위의 세 개의 영상으로 이루어져 있다.

획득한 그림 5(a)의 폐 단면영상에서 좌측 폐실질 영역에 대한 윤곽선을 검출하기 위하여 다양한 방법으로 실험을 하였다. 먼저, 1차 미분 연산자인 소벨 연산자를 이용하여 폐실질 영역의 윤곽선을 검출한 결과 그림 5(b)에서 보였다. 검출된 에지의 폭이 두꺼워 후처리 과정으로서 세신화 과정이 필요하며, 영상의 선형적인 분석을 위해서는 연속적인 폐의 윤곽선이 필요하므로 후처리로서 불연속적인 에지를 연결시키는 편집 과정이 필요하다.

중심 기만에 의한 폐실질 영역 검출 방법은 폐실질 영역내의 임의의 한 지점으로부터 방사방향을 따라서 개산된 경사값을 이용하는데 임계치보다 높은 지점을 폐의 경계점들을 검출

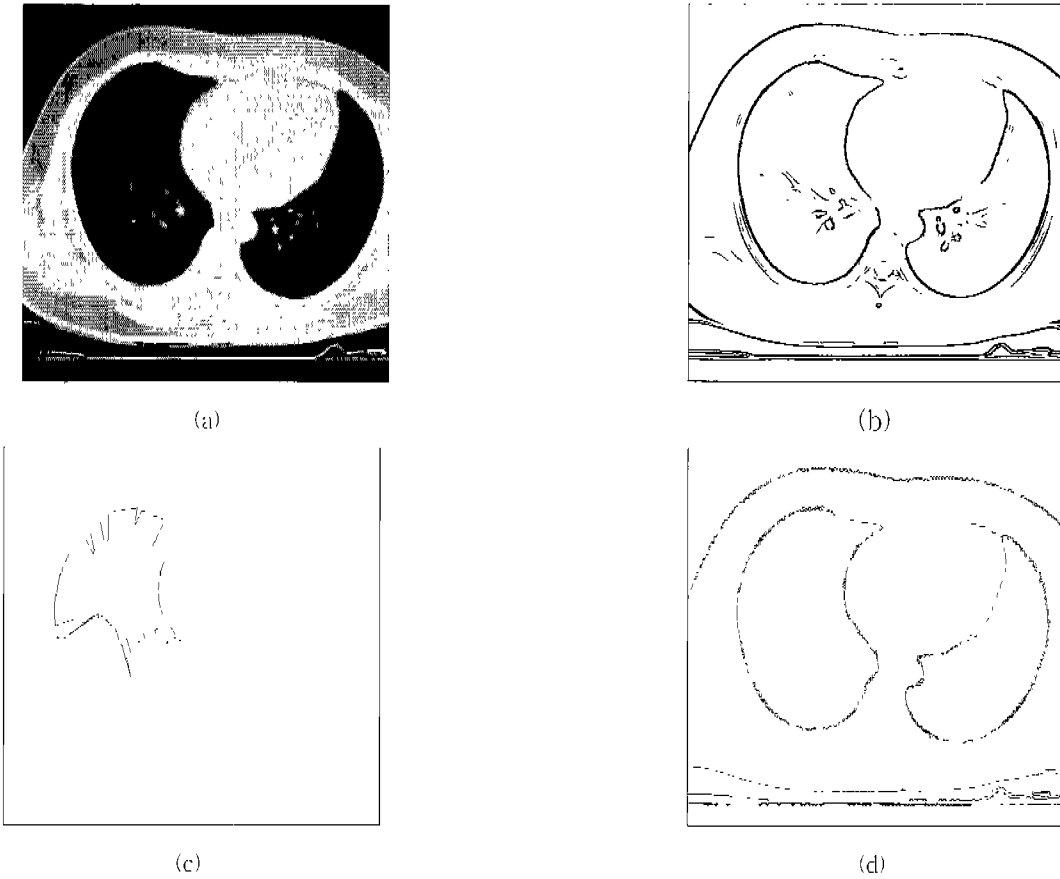


그림 5. 폐실질 영역 검출결과: (a) 폐에 대한 EBT 원영상; (b) 소벨연산자방법; (c) 중심기반방법; (d) 에지추적 방법

Fig. 5. The result for extraction of the lung parenchyma region: (a) EBT original image for lungs; (b) Sobel operator method; (c) center bascd method; (d) edge following method



그림 6. 기존의 에너지함수에 의한 폐실질 영역 검출: (a) 초기 윤곽선; (b) 검출된 윤곽선

Fig. 6. The extraction of the lung parenchyma by conventional energy function: (a) Initial contour; (b) detected contour

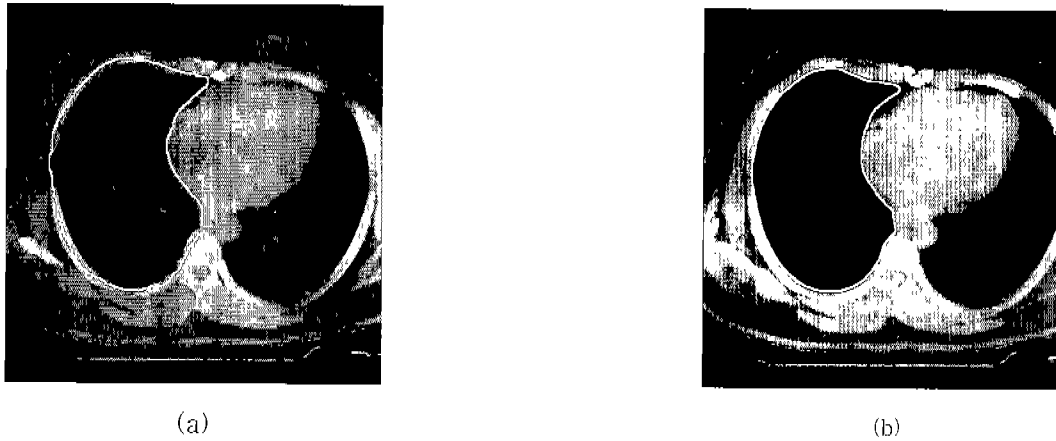


그림 7. 제안한 에너지함수에 의한 폐실질 영역 검출: (a) 초기 윤곽선; (b) 검출된 윤곽선
 Fig. 7. The extraction of the lung parenchyma by proposed energy function: (a) Initial contour; (b) detected contour.

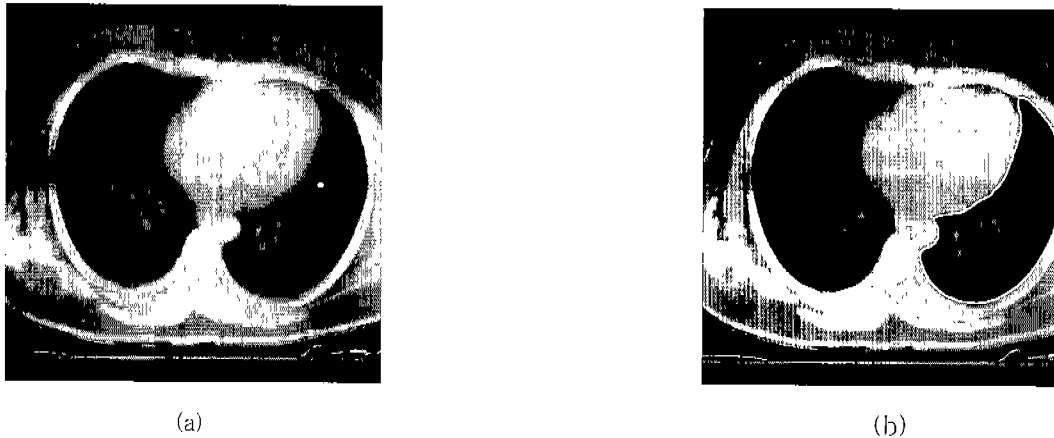


그림 8. 영역성장법에 의한 폐실질 영역 검출: (a) 초기점; (b) 검출된 윤곽선
 Fig. 8. The extraction of the lung parenchyma by region growing: (a) Initial point; (b) detected contour

하고 이 경계점들을 연결하여 폐실질 영역의 윤곽선을 검출하게 된다. 잡음에 민감한 방사선 탐색 구조로 인하여 폐의 윤곽선보다는 폐포 영역을 검출하게 되어 폐실질 영역의 경계점들을 검출하지 못하는 것을 그림 5(c)에서 볼 수 있다.

에지 추적에 의한 검출 방법은 에지의 강도와 방향을 구하고 에지 강도가 임계치보다 큰 화소에 대하여 동일한 방향의 화소와 $\pm 45^\circ$ 방향의 새 화소 중에 에지 강도가 최대인 화소에 대하여 윤곽선을 추적한다. 전체적인 폐실질 영역의 윤곽선이 검출되어 있으나 미세한 잡음 영역까지 윤곽선으로 검출한 것을 볼 수 있어, 폐실질의 윤곽선을 환경하고 수정하기 위한 조작자의 편집 과정이 필요하다라는 것을 그림 5(d)에서 알 수 있다.

기존의 동적 윤곽선 모델의 에너지 함수를 이용하여 검출한 폐실질 영역의 윤곽선을 그림 6에 보였으며 이때 가중치 α , β

를 각각 50, 100으로 하였다. 그림 6(a)는 초기에 설정한 윤곽선이고 그림 6(b)는 동적 윤곽선 모델에 의해 검출된 윤곽선으로서 에지와 곡률 성분만에 의한 동적 윤곽선 방법에서는 초기 설정한 윤곽선으로부터 폐실질 영역쪽으로의 윤곽선 이동이 불완전하여 부분적으로 윤곽선 검출이 이루어지지 못함을 볼 수 있다. 이는 폐실질 좌측의 휘도 준위가 매우 밝은 에지 영역에 윤곽선이 검출되어 폐실질 영역쪽으로 윤곽선이 이동하지 못하기 때문이다.

제안한 에너지를 추가한 동적 윤곽선 모델의 에너지 함수로써 검출한 폐실질 윤곽선을 그림 7에 보였으며 이때 가중치 α , β , 및 γ 를 각각 50, 20, 및 4로 설정하였다. 그림 7(a)의 초기 윤곽선으로부터 휘도 준위가 어두운 폐실질 영역으로 윤곽선 이동이 이루어져, 폐실질 영역의 윤곽선을 효과적으로 검출하였음을 볼 수 있다.

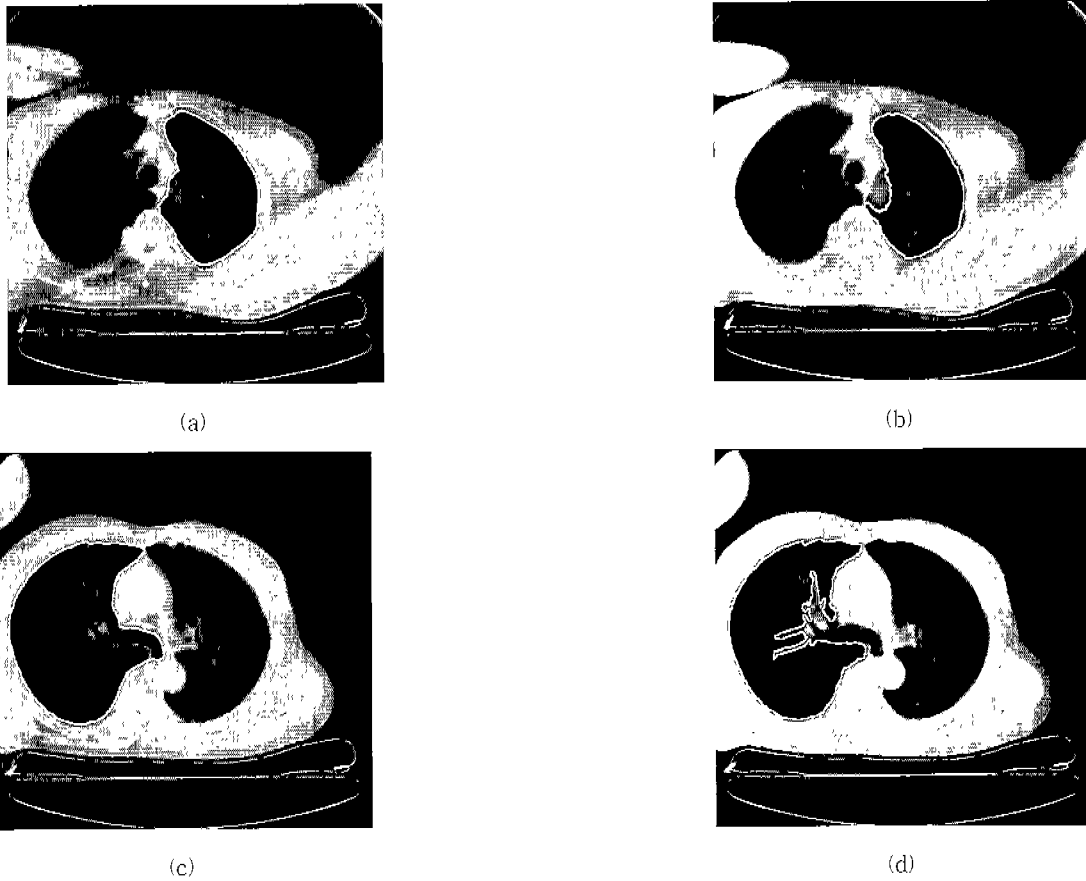


그림 9. 검출방법론의 비교: (a),(c) 동적 윤곽선 모델; (b),(d) 영역 확장법
 Fig. 9. Comparison of detection methods: (a),(c) Dynamic contour model; (b),(d) region growing method

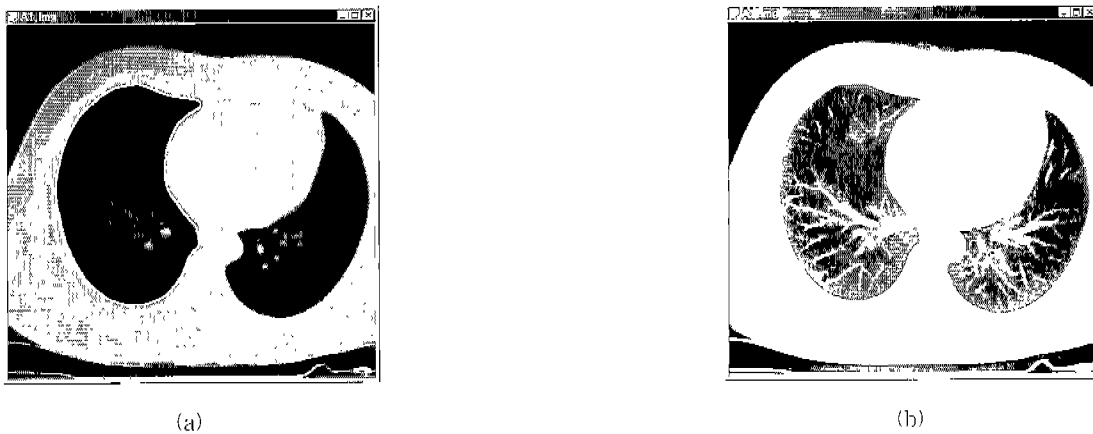


그림 10. 영상의 변화: (a) 원 영상; (b) 대조도가 향상된 영상
 Fig. 10. The variation of image: (a) Original image; (b) contrast enhanced image

비교식 휘도 준위가 낮으며 변화가 거의 없는 폐실질 영역을 영역 성장법을 이용하여 우측 폐를 검출한 결과를 그림 8에 보였다. 그림 8(a)에 보는 바와 같이 우측 폐의 내부에 임의의 초기점을 지정한 후에 동일한 통계적 특성의 영역 검출을 보상

하기 위한 임계치를 120으로 설정하여 효과적으로 폐실질 영역을 검출한 결과를 그림 8(b)에 보였다.

동적 윤곽선 모델에 의한 방법과 영역 확장에 의한 폐실질 윤곽선 검출을 비교하면, 먼저 그림 9(a)에서 우측 폐실질의 경

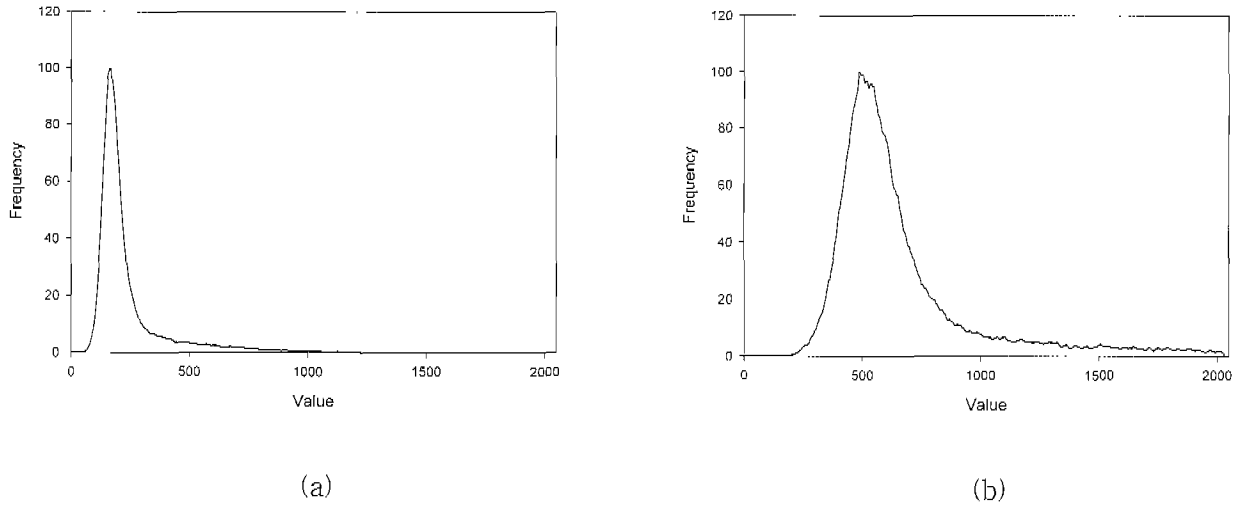


그림 11. 히스토그램의 변화: (a) 원 히스토그램; (b) 대조도가 향상된 히스토그램
 Fig. 11. The variation of histogram: (a) Original histogram; (b) contrast enhanced histogram

출 결과를 비교하면 두 방법의 차이를 알 수 있다. 그림 9(a)에서는 폐실질에 포함되고 그림 9(b)에서는 폐실질에 포함되지 않는 영역이 있는데, 이 영역은 폐실질과 인부 조직(soft tissue)의 부분 체적 평균화(partial volume averaging) 효과로 인하여 휘도가 떨어지는 영역으로서 진단 목적에 따라 폐실질 영역에 포함시킬 수도 있고 제외할 수도 있다. 그림 9(b)와 같이 동일한 통계적 특성을 가지는 영역을 확장시키는 영역 성장에 의한 방법으로는 이 영역을 폐실질 영역에 포함시켜 윤곽선을 검출하기가 곤란하다. 이때는 그림 9(a)의 국부 영역에서 에너지가 최소가 되는 지점으로 윤곽선을 이동시키는 동적 윤곽선에 의한 방법을 사용하여야 한다. 이와 반대로 폐실질 영역에서 제외시키고자 할 경우에는 영역 확장법이 유리하다. 따라서, 진단 목적에 적절하게 선택되어야 함을 알 수 있다. 그림 9(c)는 동적 윤곽선 모델에 의하여 기관지가 포함되도록 폐실질 영역을 검출한 결과로서 폐문부에 병변이 있을 경우에 농도 분포의 변화를 관찰할 수 있도록 폐실질 영역에 포함시키게 된다. 기관지를 폐실질에 포함시켜 영역을 검출할 경우에는 기관지가 인부 조직과 연결되어 있기 때문에 폐실질 영역 확장법에 의해서는 곤란하며, 동적 윤곽선 모델에 의해 검출하여야 한다. 그림 9(d)는 기관지를 폐실질에서 제외시켜 영역 확장법에 의해 검출한 폐실질 영역으로서 이 경우에는 영역 확장법이 유리하다고 하겠다.

EBT 영상으로부터의 폐실질 영역을 추출함에 있어 진단 목적에 따라 동적 윤곽선 모델과 영역 확장법을 적절하게 사용하여야 하며, 동일한 결과를 나타내는 영상일 경우 폐실질 영역의 외부에 초기 윤곽선을 설정해 주어야 하는 동적 윤곽선 모델에 의한 방법보다는 폐실질 영역 내부에 임의의 초기 지점만 설정하는 폐실질 영역 성장법이 사용상 유리하다.

폐실질 영역을 추출한 후에 폐실질 영역에 대한 히스토그램

분석을 하기 위하여 윈도우와 레벨을 변화시켜 영상의 대조도를 향상시켰다. 휘도 준위가 낮아 폐 가지들을 자세히 구별하기 관련한 그림 10(a)의 영상을 윈도우와 레벨을 각각 700 및 500으로 변화시킴으로써 향상된 결과를 그림 10(b)에서 관찰할 수 있었으며, 그림 11(a), (b)에 각각의 히스토그램 분포 변화를 보였다.

개발된 소프트웨어는 Windows 95/98/NT 운영체제의 PC 환경 하에서 작동하며, GUI를 지원한다. EBT의 Raw 데이터 포맷과 CT의 DICOM 파일 포맷 지원할 수 있으며, 데이터 입력과 분석을 일괄 처리하며 처리 결과의 파일 저장 및 OLE 기능을 가쳐 다른 프로그램에서 처리 결과를 이용할 수 있도록 하였으며 신체적인 흐름도를 그림 12에 보였다. 그림 13에서 EBT 영상으로부터 폐실질 영역 검출 방법의 선택, 폐실질 영역의 검출, 윈도우의 크기와 레벨을 변화시킴으로써 대조도의 향상, 히스토그램 분석을 위한 각종 파라미터 추출을 위한 소프트웨어의 외형도를 보였다.

폐실질 농도의 변화와 폐실질과의 상관관계를 밝히기 위하여 Riemuller등은 beagle dogs의 폐실질 농도 빈도 분포에 대한 분석을 시행하여 폐실질 평균 농도와 FWHM은 폐용적이 증가함에 따라 감소한다고 보고하였다. Beinert 등[2]은 50% 폐 환량상태에서 측정된 평균 농도가 정상 대조군과 비교하여 만성 폐쇄성 폐질환자에서 유의하게 낮고 특발성 폐섬유증 환자에서 높다고 하였다.

본 연구에서도 폐질환 진단을 위하여 EBT 장비를 이용하여 피검자로부터 상, 중, 하 폐야 각 한 영상씩을 호흡 조절기에 의해 실제 폐활량의 70%, 50%, 20% 호흡상태에서 획득한 후에 개발한 소프트웨어를 이용하여 폐실질 영역의 검출 후 농도 분포 곡선 분석을 하였으며, 각 지수들에 대한 통계는 SPSS/PC+의 ANOVA 테스트로써 처리하였다.

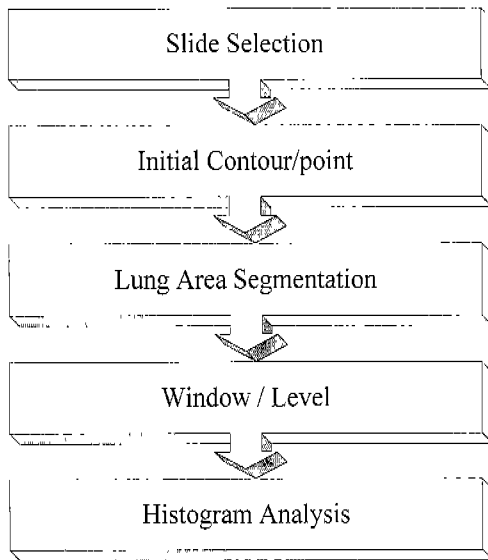


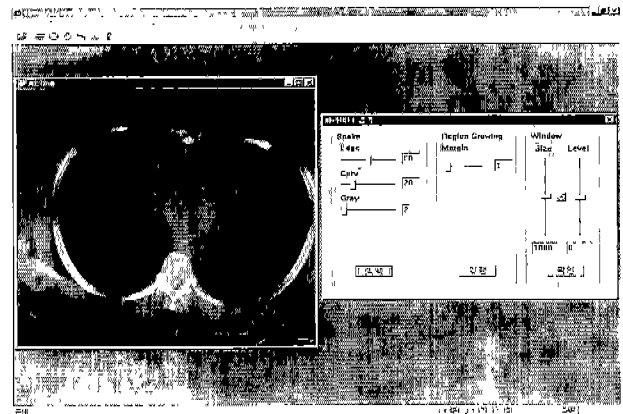
그림 12. 히스토그램 분석의 흐름도
 Fig. 12. The flowchart of histogram analysis

10명의 정상 대조군에서 폐활량 70%, 50%, 그리고 20% 호흡 수준에서 하부, 중부, 상부의 총 폐야에 대한 각각의 평균 농도, 최대 빈도 농도, 최대 상승 기울기, 최대 상승 기울기 농도, 최대 하강 기울기, 최대 하강 기울기 농도, FWHM를 표 1에서 보였다. 이들 정량적 요소들 중 평균 농도, 최대 빈도 농도, 최대 상승 기울기 농도, 그리고 FWHM은 호흡 수준의 변화에 따라 통계적으로 유의하게 증가하였다(P<0.05).

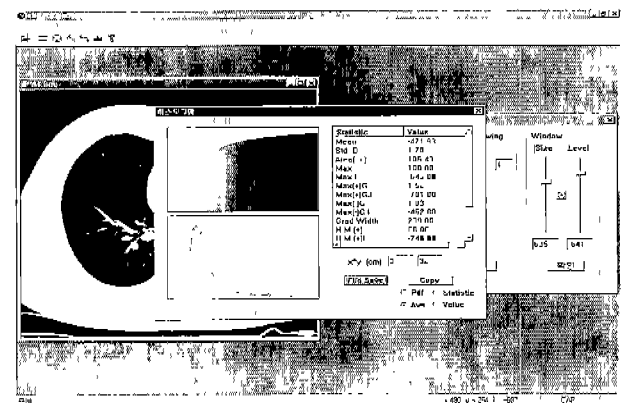
10명의 폐기종 환자에서 폐활량 70%, 50%, 그리고 20% 호흡 수준에 따른 평균 농도, 최대 빈도 농도, 최대 상승 기울기, 최대 상승 기울기 농도, 최대 하강 기울기, 최대 하강 기울기 농도, FWHM을 표 2에서 보였다.

이들 정량적 요소들 중 평균 농도, 최대 빈도 농도, 최대 상승 기울기 농도, 그리고 FWHM은 호흡 수준의 변화에 따라 통계적으로 유의하게 증가하였다(P<0.05). 그림 14에서와 같이 동일한 호흡 수준에서 폐기종 환자의 농도 분포 곡선은 정상인보다 더 낮은 농도 영역에 위치하여 정상인과 쉽게 구별되었다. 폐활량 70%에서 20%로 호흡 수준이 감소하면 농도 분포 곡선이 더 높은 농도 쪽으로 이동하지만 정상인의 농도 분포 곡선의 보다 이동의 정도가 적었다.

2명의 특발성 폐 섬유증 환자에서 폐활량 70%, 50%, 그리고 20% 호흡 수준에 따른 평균 농도, 최대 빈도 농도, 최대 상승 기울기, 최대 상승 기울기 농도, 최대 하강 기울기, 최대 하강 기울기 농도, FWHM도 표 2에서 보였다. 특발성 폐섬유화증 군에서는 정상 대조군에 비해 평균농도, 최대 빈도 농도, 최대 상승 기울기 농도, FWHM이 높게 측정되었으며 농도 분포 곡선은 그림 15와 같이 고농도 쪽으로 치우쳐 있음을 알 수 있었다. 특발성 폐섬유화증 환자에서도 폐활량 70%에서 20%로 호흡 수준이 감소하면 농도 분포 곡선이 더 높은 농도 쪽으로 이동하고, 평균 농도는 339.9HU, 최대 빈도 농도는 433.6HU, 최



(a)



(b)

그림 13. (a) 폐실질 영역 추출 방법 선택 및 (b) 히스토그램 분석

Fig. 13. (a) The selection of the lung parenchyma extraction method and (b) histogram analysis

대 상승 기울기 농도는 415.7HU, 그리고 FWHM은 163.7씩 각각 증가하였다.

폐활량의 70%, 50%, 및 20%의 일정한 호흡 수준에서 각각의 양식 요소들을 비교한 결과, 70% 호흡 수준에서는 최대 상승 기울기 농도만이 통계적으로 유의한 차이를 보였으나, 50%와 20% 호흡수준에서는 평균 농도, 최대 빈도 농도, 최대 상승 기울기 농도가 통계적으로 유의한 차이를 보였다(P<0.05). 특히 폐활량 20% 호흡 수준에서 정상 대조군과 만성 폐쇄성 폐질환군 사이에 평균 농도의 차이는 250.2HU, 최대 빈도 농도의 차이는 304.2HU, 최대 상승 기울기 농도의 차이는 290.5HU로 나타나 폐활량 20% 호흡 수준에서 두 군간에 가장 분명한 차이를 보였다.

결론

본 논문에서는 호흡 연동 장치와 EIBT 장비를 이용하여 획득한 폐영상에 대하여 제안한 능적 윤곽선 모델에 의한 방법과

표 1. 정상 대조군에서 각 호흡상태에서의 정량분석 요소 평균값

Table 1. The mean of quantitative analysis parameters in normal

Parameter	70%	50%	20%
Mean density (IU)	-314.7	167.9	104.3
Maximal density (HU)	-447.5	-303.8	-38.8
Maximal ascending gradient	1.195	1.29833	1.5335
Maximal ascending gradient density (IU)	-551.23	-423.47	-158.83
Maximal descending gradient	1.19617	1.8375	5.91467
Maximal descending gradient density (IU)	244.7	787.117	939.783
Full width at half maximum (HU)	316.017	407.433	504.367

(ANOVA test : P<0.05)

표 2. 미만성 폐질환군에서의 정량적 분석요소들의 평균값

Table 2. The mean of quantitative analysis parameters in abnormal

Parameter	만성 폐쇄성 폐질환			특발성 폐 섬유화증		
	70%	50%	20%	70%	50%	20%
Inspiration status (% of vital capacity)						
Mean density(HU)	-322.4	-280.9	-145.9	-49.4	30.7	290.5
Maximal density(IU)	-496.8	-465.7	-343.0	-272.3	-165.5	161.3
Maximal ascending gradient	1.277	1.336	1.398	1.651	1.682	2.113
Maximal ascending gradient density(HU)	-609.1	-575.3	-449.3	365.4	-303.4	50.3
Maximal descending gradient	1.985	2.178	3.929	7.363	7.248	17.447
Maximal descending gradient density(IU)	706.8	599.9	992.2	1003	1003	1003
Full width at half maximum	423.4	470.3	520.2	598.3	607.6	762.0

(ANOVA test : P<0.05)

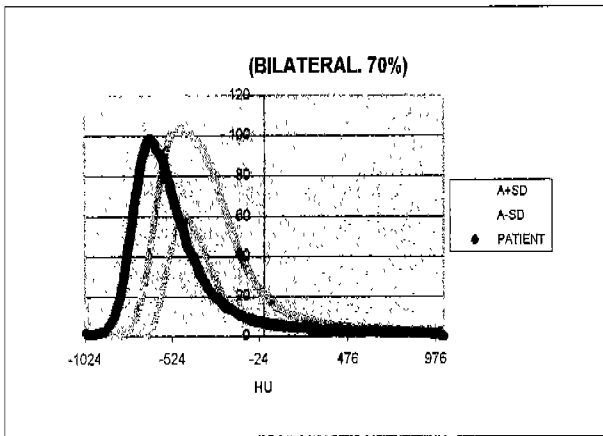
영역 성장법은 사용하여 폐실질 영역을 추출하였으며, 추출된 폐실질 영역내에서 각종 정량적 지수들을 도출하여 농도 분포 곡선에 대한 분석을 수행하였다.

동적 윤곽선 모델에 의한 방법에서 폐실질 영역내에 분포한 공기 성분으로 인하여 어렵게 나타나는 휘도 준위와 폐의 윤곽선 벡터에 대한 방향을 고려한 에너지를 부가한 새로운 에너지 함수를 제안하였으며 폐실질 영역 성장법에서는 폐실질 영역내의 분포한 공기 성분에 대한 화소를 확장시켜 효과적으로 폐실질 영역을 검출하였다. 추출된 폐실질 영역내의 빈도 분포 곡선의 정량적 분석을 통하여 정상군과 비교한 결과, 만성 폐쇄성 폐질환자에서는 폐실질 평균 농도, 최대 빈도 농도, 최대 상승 기울기 농도가 낮았으며, 농도 분포 곡선은 정상군의 농도 분포 곡선에 비하여 더 낮은 농도 쪽으로 이동하였음을 알 수 있었다. 또한, 특발성 폐섬유증 환자에서는 평균 농도, 최대 빈도 농도, 최대 상승 기울기 농도가 모두 증가되었고 농도 분포 곡선은 더 높은 농도 쪽으로 이동하였다. 따라서 폐실질 영역을 추출하여 히스토그램 분포에 대한 정량적 분석을 함으로써

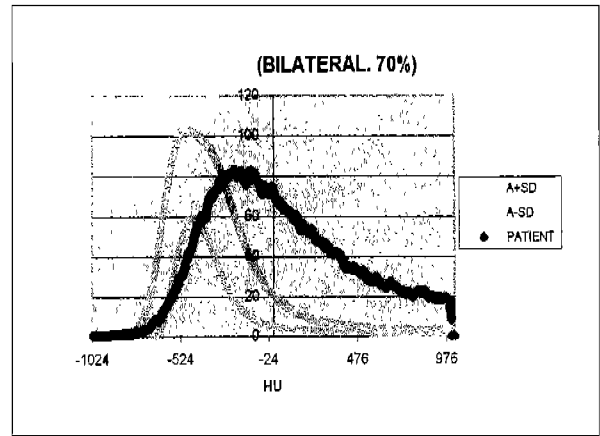
정상군과 만성 폐쇄성 질환과 특발성 폐섬유증을 구분할 수 있음을 확인하였다. 따라서, 이러한 히스토그램 분석법은 다수의 정상 및 비정상 군에 대한 검사와 적절한 정량분석요소의 설정으로 미만성 폐실질병변의 진단 및 추적에 유용한 정량적 검사법이 될 것으로 생각된다. 더 다양한 연령층의 정상군에서 연구가 이루어진다면 이러한 폐실질 농도 분포 분석은 미만성 폐질환의 조기진단 및 추적 관찰에 유용한 검사가 될 것이다.

참고 문헌

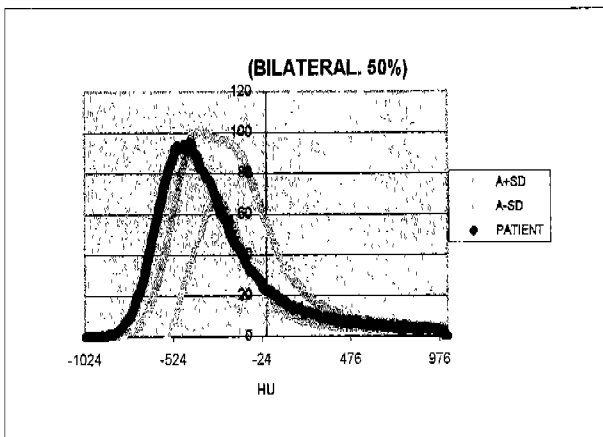
1. R. Rienmuller, J. Behr, T. Beinert, F. Mehnert, and W. Kalender, Evaluation of CT histograms determined by spirometrically standardized high resolution CT studies of the lung in man, *Advances in CT*, pp. 19-24, Springer Verlag, Berlin, 1997
2. T. Beinert, J. Behr, and F. Mehnert "Spirometrically controlled quantitative CT for assessing diffuse



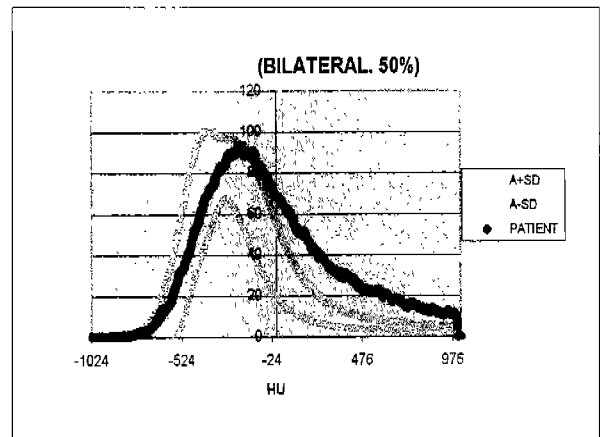
(a)



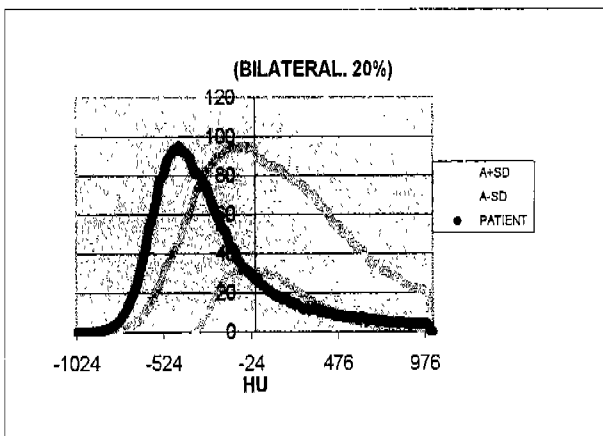
(a)



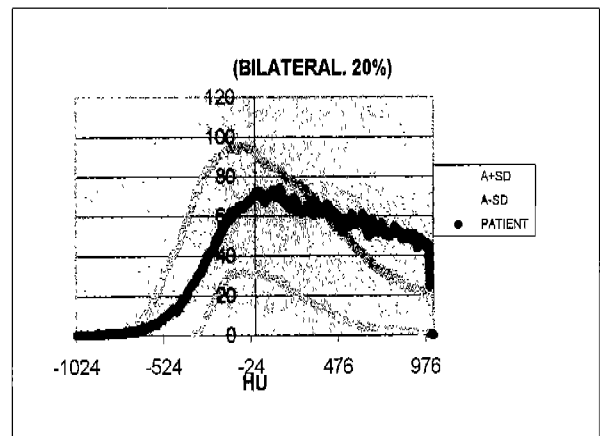
(b)



(b)



(c)



(c)

그림 14. 만성 폐쇄성 질환자의 히스토그램 분석: (a) 최대 호흡량의 70%; (b) 50%; (c) 20%
 Fig. 14. Histogramic analysis in emphysema patient: (a) 70% (b) 50%; (c) 20% of vital capacity

그림 15. 특발성 폐섬유화증 질환자의 히스토그램 분석: (a) 최대 호흡량의 70%; (b) 50%; (c) 20%
 Fig. 15. Histogramic analysis in idiopathic pulmonary fibrosis patient: (a) 70% (b) 50%; (c) 20% of vital capacity

- parenchymal lung disease,*" J Comput Assist Tomogr, vol. 19, pp. 924-931, 1995
3. W.L. Foster, E.I. Gimenez, and M.A. Roubidous, "The emphysema: radiologic-pathologic correlations," Radiographics, vol. 13, pp. 311-328, 1993
 4. J.C. Hogg, "Bronchiolitis in asthma and chronic obstructive pulmonary diseases," Clinics in Chest Medicine, vol. 14, pp. 733-740 1993
 5. N.L. Muller, "Clinical value of high-resolution CT in chronic diffuse lung disease," AJR, vol. 157, pp. 1163-1170, 1991
 6. R.J. Lamers, G.R. Thelissen, A.G. Kessels, E.F. Wouters, J.M. Van Engelshoven, "Chronic obstructive pulmonary disease: evaluation with spirometrically controlled CT lung densitometry," Radiology, vol. 193, pp. 109-113, 1994
 7. W.A. Kalender, R.K. Rienmuller, W. Seissler, J. Behr, M. Welke, and H. Fichte, "Measurement of pulmonary parenchymal attenuation: use of spirometric gating with quantitative CT," Radiology, vol. 175, pp. 265-268, 1990
 8. M. Kass, A. Witkin, and D.Terzopoulos, "Snake: Active contour models," Proc. of First International Conference on Computer Vision, vol. 1, pp. 259-269, 1987
 9. D.J. Williams and M. Shah, "A fast algorithm for active contours and curvature estimation," CVGIP, vol. 55, pp. 14 26, 1992
 10. 원철호, 김병남, 조진호, "초음파 영상의 통계적 특성에 근거한 심내벽 윤곽선 검출," 의공학회논문지, 제17권, pp. 365-371, 1996
 11. L. Wexler, "Coronary Artery Calcification: Pathophysiology, epidemiology, imaging methods, and clinical implications." Circulation, vol. 94, pp. 1175-1192, 1996